

MESO-REGION SCALE CHANGE OF CLIMATE IN THE 21TH CENTURY AND ITS POTENTIAL IMPACTS ON THE ENVIRONMENT IN THE CARPATHIAN BASIN

Viktória Blanka¹ – Gábor Mezősi¹ – Wolfgang Loibl² – Gabriella Szépszó³ – Péter Csorba⁴ – Burghard Meyer⁵ – Teodóra Bata¹ – Richárd Nagy⁴ – Róbert Vass⁴

¹University of Szeged, Department of Physical Geography and Geoinformatics

²Austrian Institute of Technology

³Hungarian Meteorological Institute

⁴University of Debrecen, Department of Landscape Protection and Environmental Geography

⁵Universität Leipzig, Institut für Geographie

Introduction

In the twentieth and twenty-first centuries, the warming of the global climate system global is becoming increasingly obvious and further warming is expected. This warming is accompanied with changing precipitation conditions, causing more frequent and more serious natural disasters, which lead to financial and environmental losses (IPCC 2007). This climate change has significant effects on the natural environment. Large number of investigations have demonstrated, that the actual changes of the temperature and precipitation take significant effects on all factors of the environment, thus they can alter the rate of the geomorphologic processes (DIKAU – SCHROTT, 1999), soil erosion (MUNKA et al., 2007), living condition of the vegetation (RITCHIE, 1986; FLANNIGAN et al., 2000) etc. Therefore, a comprehensive knowledge of these effects is essential to mitigate their unwanted consequences. At present the most suitable method to analyse the future climate change is probably the application of regional climate models. There are several different regional climate models available and four of them (ALADIN, REMO, PRECIS, RegCM) are already tested and applied for the Carpathian Basin. The extremity of the climate became more and more pronounced also in the Carpathian Basin in the last decades and it is expected that in the future decades this tendency will persist. The models predicted a continuous, inconstant temperature increase, with the most intense increase occurring in the summer months (the rate of change is similar to that experienced between 1980 and 2010). The change in yearly precipitation in the models was not significant; however, the distribution of precipitation within a year is expected to be more heterogeneous, with decreasing summer and increasing winter precipitation (BARTHOLY et al., 2008; SZABÓ et al., 2011; CSORBA et al., 2012). Climate simulations show that extreme climate events may occur more frequently in the Carpathian Basin over the next century and that more prolonged and severe hot and dry periods are expected (SZÉPSZÓ, 2008).

This research therefore investigates the effects of changing weather extremes on meso-regional-scale landscape vulnerability. Climatic-exposure parameter analysis was performed on a predicted climate change scenario. Soil erosion caused by water, drought, soil erosion caused by wind, mass movement and flash floods were analysed for the time periods of 1961–1990, 2021–2050 and 2071–2100.

Methods

Determination of the landscape units

The traditional landscape micro-regions (PÉCSI – SOMOGYI, 1967) were defined by using the geomorphologic characteristics of the landforms for the regional and local typifications. However the regional climatic models used in this study did not include enough data for a micro-region scale analysis. Therefore, it was practical to analyse at the aggregated hierarchical level of meso-scaled landscape units.

In the analysis 18 landscape units were defined, because the analysis of the 230 traditional, environmentally homogeneous micro-regions of Hungary was not possible due to the resolution of the climate data (Fig. 1). The areas of the defined units are better suited not just to the resolution of the climate data, but the demands of spatial planning. The determination of the landscape units was based on the spatial diversity of landscape shaping factors (relief, soil, geology, vegetation, land use and climate). In some cases the borders of the units were also fitted to the border of larger natural landscape units (e.g., micro-regions along the middle and lower sections of the Tisza River) and economic regions (e.g., central Hungary), where the border was justified by the climate dependence of the land use. Thus the physical parameters are relatively homogeneous in the units; therefore, any climate change affects the entire unit in more or less the same way. An analysis on this scale can be important for the recognition of probable future climate effects and in the preparation of strategic spatial plans.

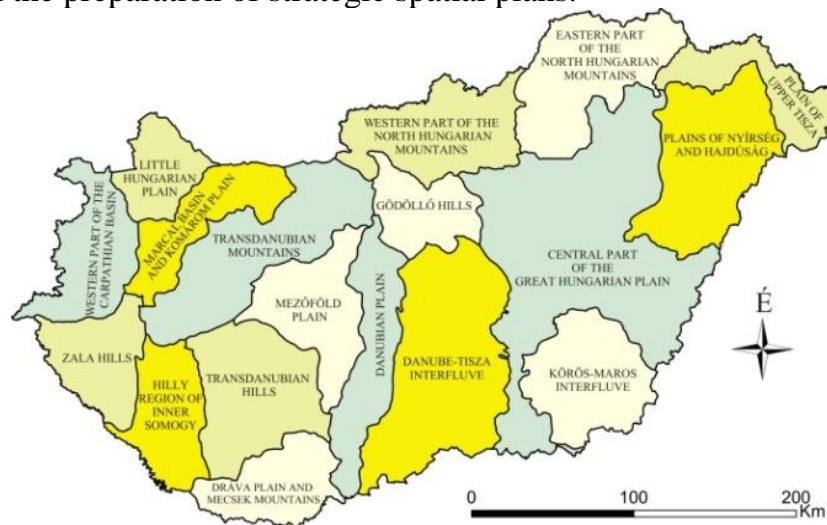


Fig. 1. The examined landscape units
1. ábra. A vizsgált tájegységek

Calculation of the climate data

It is difficult to sketch a valid picture of climate change for the entire area of Hungary. Scaling down tendencies is hindered by several factors. One initial basic problem was the choice of the climate change scenario to be considered (IPCC, 2007; BARTHOLY – PONGRÁCZ, 2010). Another essential aspect is the selection of the regional climate change model. The available models are different in the resolution of the data and also in the basic model assumptions. In Hungary four regional models (ALADIN, REMO, PRECIS, RegCM) were run and tested, and REMO and ALADIN models seemed the most reliable for Central Europe. Therefore the expected future changes of the climate

parameters were analysed using two regional climate models, REMO and ALADIN. The models utilise the A1B scenario, which represents the average changes of greenhouse gas emissions, to model anthropogenic climate forcing. The A1B scenario describes an integrated world with rapid economic growth, slowing population increases, a quick spread of new and efficient technologies and a balanced emphasis on all energy sources. The resolution of the climate data was 0.22° (approximately 25 km). The climate projections were generated by the Numerical Modelling and Climate Dynamics Division of the Hungarian Meteorological Service.

For the calculations daily temperature and precipitation data for the periods from 2021–2050 and 2071–2100 were used. The temperature and precipitation changes are expressed in °C and mm, respectively, with respect to the reference period of 1961–1990. The following changes in the extreme climate indices were also generated from the two models: frost days in days/year; summer days ($T_{\max} > 25$ °C) in days/year; heat waves ($T_{\text{mean}} > 25$ °C) in days; extremely heavy precipitation days ($R_{\text{day}} \geq 20$ mm and $R_{\text{day}} \geq 30$ mm), in days/year; and the simple daily intensity index (SDII), which is a measure of the precipitation amount per rainy day, $R_{\text{day}} \geq 1$ mm, in mm/day. From all of these data, average yearly data were calculated and average monthly data from precipitation and temperature data were calculated and evaluated for the two study periods for each grid point. Regional average values were calculated for the landscape units based on the climate parameters at each grid point.

Results

Meso scale change of climate on the basis of REMO and ALADIN models

The yearly mean temperature is expected to increase on every landscape units by 1.2–2 °C for the period of 2021–2050 and by 3.4–3.7 °C for the period of 2071–2100 compared to the reference period of 1961–1990. Because of the small area of the country, there are only slight spatial differences in the future changes of the temperature, based on the models. However a characteristic trend like increase can be observed from north-west to south-east (Fig 2).

On the basis of the separate analysis of the winter and summer half years, it can be observed that the spatial pattern of the changes in the mean temperature is the same as in the case of the yearly mean, however the increase in the summer half year (1.6–2.1 °C in the period of 2021–2050 and 3.8–4.2 °C in the period of 2071–2100) is expected to be higher than in the winter half year (1.2–1.4 °C in the period of 2021–2050 and 2.9–3.1 °C in the period of 2071–2100) on all landscape units.

In case of the changes of temperature extremes, it can be seen that the number of summer days and heat waves are expected to increase, while the number of frost days is expected to decrease on all landscape units. The spatial differences in the country are higher than in case of mean temperature. Particularly this spatial difference is distinctive in case of the heat waves. The average of the two models shows that the changes of the number of heat waves and the number of frost days is expected to increase from north to south in the period of 2071–2100. The increase of the number of summer days however will be more and more higher from south to north (Fig. 4).

There are more distinct spatial differences in the changes of the yearly precipitation sum. The difference between the minimum and maximum value on the landscape

units is approximately 90 mm in the modelled periods. Moreover, on some landscape units, the direction of the changes is also different. The spatial pattern of the precipitation change is similar to the changes of the mean temperature; as it will slightly increase on the north-western part of the country and the highest precipitation decrease can be observed on the south-eastern part of the country (Fig. 3).

On the basis of the separate analysis of the winter and summer half years, significant difference can be detected between the two half year. In the summer half year slight increase is expected on the north-western part while on the south-eastern part slight decrease is predicted for the period of 2021–2050. For the period of 2071–2100 precipitation decrease is expected on all landscape units, but with different rate ((-59) – (-20) mm). However in the winter half year the precipitation change will be negligible (less than 10 mm) on all landscape units for the period of 2021–2050. For the period of 2071–2100 the winter precipitation will increase by 25–46 mm on the units.

The number of days with extremely high precipitation is expected to increase in the whole country; however the rate is significantly diverse on the landscape units. On the basis of the average of the two models the rate of changes in case of the days with more than 20 mm precipitation is varied between 0.2 and 1.4 days for the period of 2021–2050 and between 0.7 and 2.7 for the period of 2071–2100. In case of the days with more than 30 mm precipitation the increase is varied between 0.6 and 1.1 days for the period of 2021–2050 and between 0.9 and 1.5 for the period of 2071–2100. Typical spatial pattern can also be detected, as rate of change is predicted to be the highest on the western part and it decrease toward east and the smallest values are expected on the Great Hungarian Plain. The value of precipitation intensity index is expected to increase slightly on all landscape units in both modelled periods (Fig. 5).

Differences in the model predictions

Between the projections of the two applied models significant differences can be detected. The most uncertain part of the climate prediction is the precipitation change projection, thus the highest differences between the two models can be identified in case of this parameter. On several landscape units the tendency of the changes are also different. For the period of 2021–2050 the differences are slighter. Different direction of the changes is occurred only on the central and north-eastern part of the country. For the period of 2071–2100 the differences between the models are more significant. For this period the ALADIN model indicate decreasing precipitation for all landscape units, while REMO projects precipitation decrease only for 3 landscape units (Nyírség és Hajdúság, Alföld központi része, Körös–Maros köz) on the south-east part of the country (Fig. 6). The rate of precipitation change is also different in the models. The maximum difference was occurred on the western part, while the minimum difference was experienced on the south-east part of the country in both periods. The prediction of temperature change is more similar in the models, the spatial pattern of the changes are similar, just the rate of the changes are somewhat higher on the basis of ALADIN model for the period of 2021–2050. For period of 2071–2100 the rate of changes are also similar.

The projection of climate extremities is also different. In projection of changes of summer days more significant differences can be observed for the period of 2021–2050

than for the 2071–2100 period. In the first period REMO indicate significantly smaller changes on the northern part of the country, but these differences is diminished until the end of the 21st century (Fig. 7).

Distinguishing Climate-Region Types for Hungary

The REMO and ALADIN simulations have provided results that show differences in certain regions (particularly in the east and south), depicting the uncertainty range by applying different climate models. Multivariate statistical analysis and classification have been performed considering the climate change trends in the Hungarian climate regions and including the uncertainty range of the model simulations. The objective was to distinguish the region types with similar climate change characteristics. The landscape diversity in Hungary is relatively narrow, distinguishing the climate regions was a somewhat challenging task that was performed by applying factor and cluster analyses (LOIBL – AUBRECHT, 2011). Factor analysis was used for reducing the number of variables and generating a few distinct and integrated “super indicators” out of (via factor loadings) weighted input variables – the factor coefficients. Cluster analysis was used to group the Hungarian regions by the climate characteristics of the current and future climate by applying multivariate statistics. To conduct the clustering task, climate and climate-change indicators were extracted from raster sets of precipitation, temperature and extreme-event indicators by averaging the indicators for the 18 Hungarian meso-regions. Finally, the factor analysis results were obtained for the temperature and precipitation data subsets individually. The temperature subsets contain absolute numbers for the current and future temperature (the regional average and range within the region) and the averages of frost days ($\leq 0^{\circ}\text{C}$ Tmin) and summer days ($> 25^{\circ}\text{C}$ Tmax) by scenario version. The precipitation subsets contain current and future rainfall absolutes (totals and range within the regions), the numbers of extreme rainfall days (> 20 mm and > 30 mm per day), and the average daily rainfall sum on precipitation days (> 1 mm) by scenario. The factor analyses deliver the factor coefficients for the meso-regions as “super-indicators”. The coefficients of those factors whose eigenvalues explain more than 10% of all variables’ variance (usually 2 factors per analysis) were selected. These factor coefficients of the few important factors describe the current and future climates from the ALADIN and REMO scenario results.

Using those factor coefficients, cluster analyses were performed with alternative linkage approaches and metrics to identify the regions of similar characteristics by detecting the natural groupings in the data. Hierarchical clustering, which records the tightness of linkages between the factor coefficients by observing the similarity or “distance” between the values by (region) case, is typically applied. Several distance metrics and linking methods are available with hierarchical clustering. Ward’s linkage method was applied, which averages all the distances between pairs of objects in different clusters, with adjustments for the covariance, to determine how far apart the clusters are. As a distance metric, the normalised Euclidean distance (root-mean-squared distance) was used.

The cluster analysis results that are ultimately selected to delineate the climate regions are based on the factor coefficients of the 2 highest factors of the 4 different factor analyses for the temperature and the precipitation considering the scenario results for 2021–2050 and 2071–2100 and integrating the temperature and precipitation ranges of the meso-regions. The overall cluster analysis produced 4 climate regions in the country:

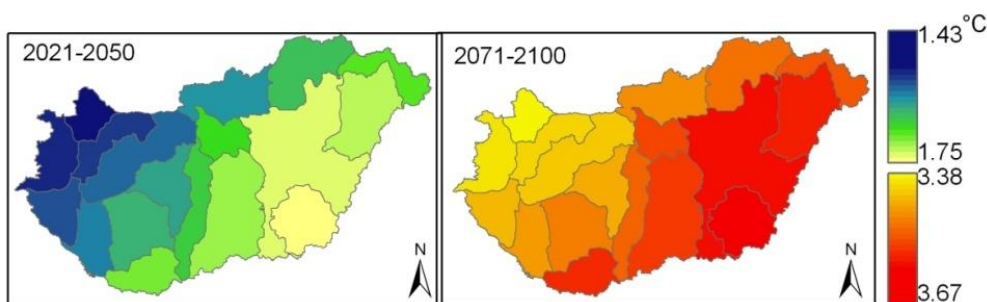


Fig. 2. Changes of mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) in 2021–2050 and 2071–2100 periods, based on the average value of REMO and ALADIN models

2. ábra. Az évi átlaghőmérséklet változása a két modell átlaga alapján 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban

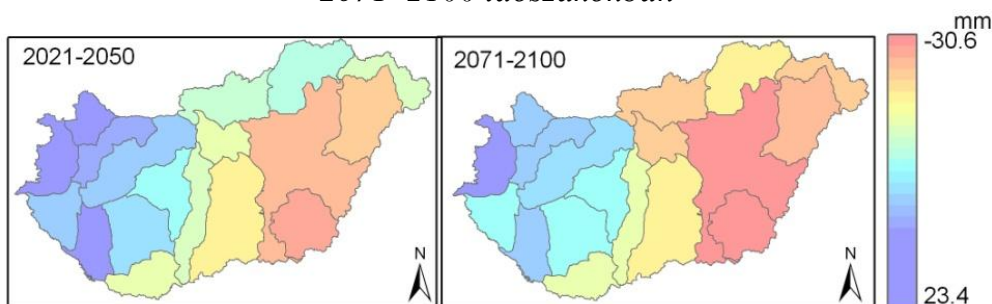


Fig. 3. Changes of mean precipitation ($^{\circ}\text{C}$) in 2021–2050 and 2071–2100 periods, based on the average value of REMO and ALADIN models

3. ábra Az évi átlagos csapadék változása a két modell átlaga alapján 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban

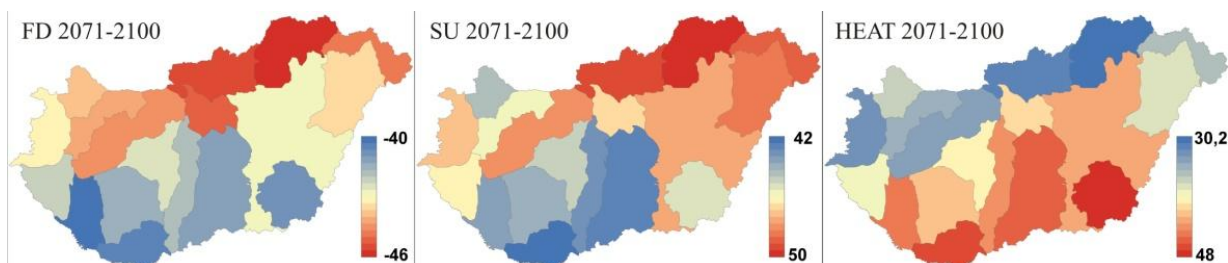


Fig. 4. Changes of extreme temperature indices (day/year) in 2071–2100 period, based on the average value of the REMO and ALADIN models

4. ábra Hőmérsékleti extrém napok számának változása a két modell átlaga alapján 2071–2100-ig

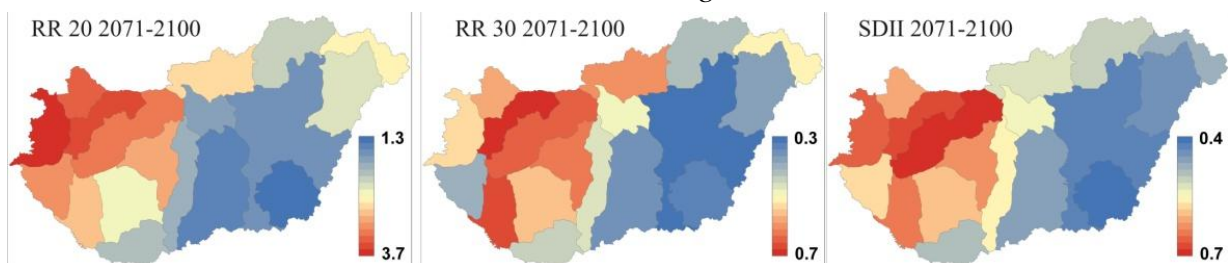


Fig. 5. Changes of extreme precipitation indices (day/year) in 2071–2100 period, based on the average value of the REMO and ALADIN models

5. ábra. Csapadék extrém napok számának változása a két modell átlaga alapján 2071–2100-ig

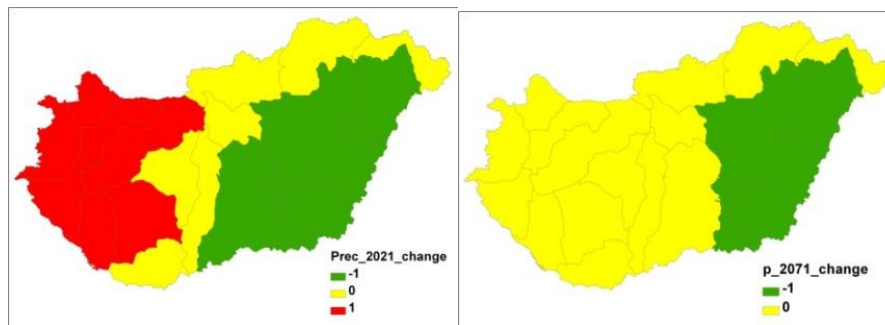


Fig. 6. The tendency of precipitation change on the landscape units: -1 both models indicate decreasing precipitation; 0 models show different direction of the changes; 1 both models indicate increasing precipitation

6. ábra. A csapadékváltozás iránya a tájegységeken: -1: mindkét modell szerint csökken a csapadék; 0: a két modell ellentétes változást jelez; 1: mindkét modell szerint nő a csapadék

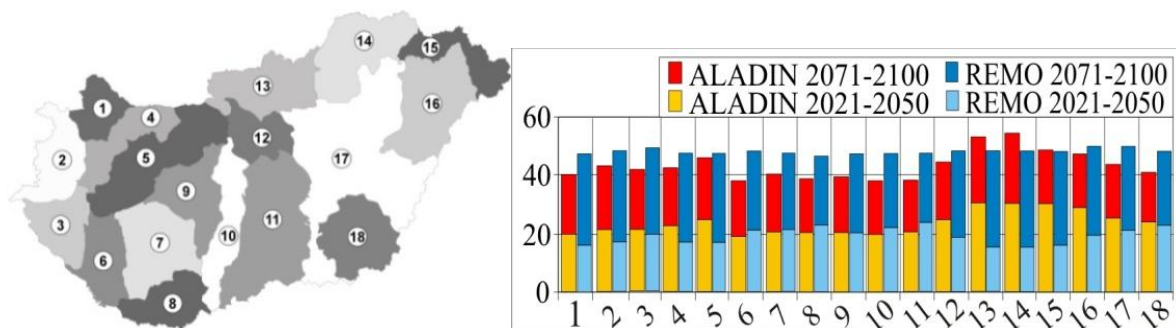


Fig. 7. Increase of the number of summer days on the landscape units, based on REMO and ALADIN models

7. ábra. Nyári napok számának növekedése az Aladin és REMO szerint

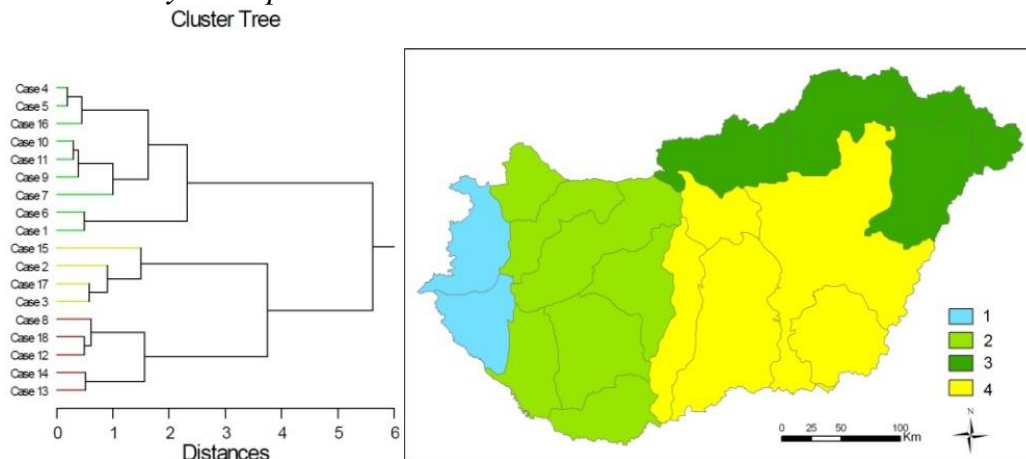


Fig. 8. Regions of similar characteristics of the all climate parameters

8. ábra. Eltérő klímaváltozási típusú régiók

The first region type is located along a west central corridor ranging from north to south. Moderate temperature increase and more distinct changes in temperature extreme events are characteristic. The precipitation totals are moderate; the future precipitation increase is expected at higher rates but with moderate changes in extreme rainfall events. The second region type covers the northeastern regions along the Slovakian border. This region has the lowest annual mean temperatures and the highest intraregional temperature variation. Moderate recent precipitation totals and moderate

future increase is typical with moderate increase of the extreme event days. *The third region type* is more or less *the Hungarian Great Plain*, without the Nyírség region. This region is characterised by a flat topography and it has the highest temperatures and the lowest annual precipitation totals. The highest temperature increase and greatest changes in extreme temperature events (increase of summer days and decline of frost days) with the highest precipitation decline ratios (or at least lowest precipitation increase ratios) and an increase of heavy rainfall days is predicted.

The fourth region type covers only 2 regions in the *western hilly area*. This type is characterized by lower temperatures, less temperature increase and less change in temperature extremes. The type is expected to be more humid, with higher precipitation totals but smaller precipitation change ratios and smaller change rates regarding heavy rain events (Fig. 8).

Investigations of the landscape sensitivity in Hungary due to climate change assessments of landscape hazards

In order of their actual importance in Hungary, the following natural processes were considered during the analysis: soil erosion by water, droughts, soil erosion by wind, flash floods and mass movements. These processes represent the most important environmental hazards for land use in Hungary (SZABÓ et al., 2008). Following these processes, a number of landscape function-based sensitivities have been spatially assessed using predictive models and diverse geo-data from multiple sources. The main aims were (1) the examination of the current situation of the indicators on the regional scale for Hungary and (2) the assessment of the changes of climate parameters predicted by REMO and ALADIN models and typified by cluster analysis in the sensitivity assessments.

Soil erosion by water considers the physical soil degradation processes at today's largest spatial extent in Hungary. The erosion sensitivity was calculated on a micro-regional scale following the Universal Soil Loss Equation (USLE) of WISHMEIER – SMITH (1978) adapted for Hungary by PATAKI (2000) and KERTÉSZ – CENTERI (2006). The parameters determining the soil sensitivity (K), length of slope (L), and steepness (S) are relatively stable; the rainfall erosivity factor (R) has the closest link to climate change. The vegetation and crop factor (C) and the measures against erosion (P) have a high degree of unpredictability because of changing land-use systems and also due to potential protective adaptive measures in the future. In our modelling example, the average RR30 value in the winter half-years was used for the calculations of extreme rainfall events (the RR30 values were calculated from REMO and ALADIN model).

Drought is a severe natural hazard that causes extensive damage in the Carpathian Basin. In this study the current probability of drought occurrence in the landscape units was analysed by using the PaDI. The present-day conditions were compared with the tendencies due to climate change. The sensitivity map was developed using the Pálfaí Drought Index (PaDI). The PaDI₀ index uses monthly temperature and precipitation data (PÁLFAI – HERCEG, 2011). The drought hazard changes induced by climate change was estimated by the regional types of climate change resulted from the cluster analysis.

Wind erosion in the Carpathian Basin has also an effect on the degradation of arable soils. The wind erosion sensitivity is primarily determined by the texture of the soil. The characteristic yearly average wind velocities close to the surface are 3 m/s in Hungary, though the values are 15–20% higher in the NW and central parts of the basin.

Wind erosion sensitivity map of the country was produced after the potential wind erosion hazard map, created by LÓKI (2011), and the future climate was linked to the regional types of climate changes, resulted from the cluster analysis.

Flash flooding is also one of the most frequent hazards in Hungary (CZIGÁNY et al., 2010; ESTRELA et al., 2001). During the analysis a flash flood sensitivity map was created. This map was produced by overlapping analysis using the relief, texture of the surface sediment and the proportion forest covering on the more than 800 minor watersheds, which are most likely affected by flash floods. The climatic parameter that was taken as the climatic-exposure climate change for the flash-flood prediction is the frequency of the extreme precipitation events higher than 30 mm (SZÉPSZÓ, 2008).

Mass movement sensitivity map was produced according to their present-day activity by using the recorded information about recent significant landslide events (JUHÁSZ, 2004; FODORNÉ – KLEB, 1986). The endangered areas are in the mountainous and hilly regions where the natural conditions, geology, the granulometric type of the sediment, relief and the actual precipitation are able to mobilise the sediment. Hilly regions with only ancient quaternary mass movement have not been considered. The future changes of mass movement hazard was estimated by this present day conditions and the climate change. The relevant climatic parameter in this case is the sum of the precipitation in the winter season.

Summarized sensitivity assessment

The sensitivity was assessed by using the threshold values for the classification of the hazard for each of the indicators in the sensitivity classes of the regional landscape in qualitative terms of low/tolerable (class 1), increased (class 2) and high (class 3). The usage of qualitative classes is a standard procedure for an equal-weighted integration of different factors in impact assessment. The applied method is simple because the uncertainty of the models (climatic and hydrological) and the limited amount of verification does not enable highly precise calculations. Practically, a matrix-based assessment was made to link the climatic exposure of the region to its sensitivity to the problematic processes. An integrative analysis of the five sensitivity assessments of the landscape functional hazards in Hungary due to climate change is summarised in the Figures 9 and 10. The figures show the expected climate change impact on two levels of interpretation: (1) by the number of indicators changed for the scenarios for Hungary for the periods of 2021–2050 and 2071–2100 compared to the 1961–1990 period (out of the maximal 5 investigated in this study); and (2) the summarised value of the hazard on the meso-regions, which shows the increasing sensitivity on a scale from 5 (very low) to 15 (very high). The highest problematic values in the processes are found in the Marcal Basin and Komárom plain in the northwest of Hungary for the first (and second) period when summarising all the sensitivity indicators. In this region, the actual processes are very active (MEZŐSI et al., 2012).

These changes in the hazard are probably not imply severe, human life-threatening risks (TOBIN – MONTZ, 1997), however the slow, but long-lasting changes of the environmental processes can increase the vulnerability and can generate serious environmental problems (e.g. drought). These results somewhat contradict the findings of SZABÓ et al., (2008), because they found that the environmental hazard is the highest in the southeast region of the country, while it is lower in the northwestern part of the country.

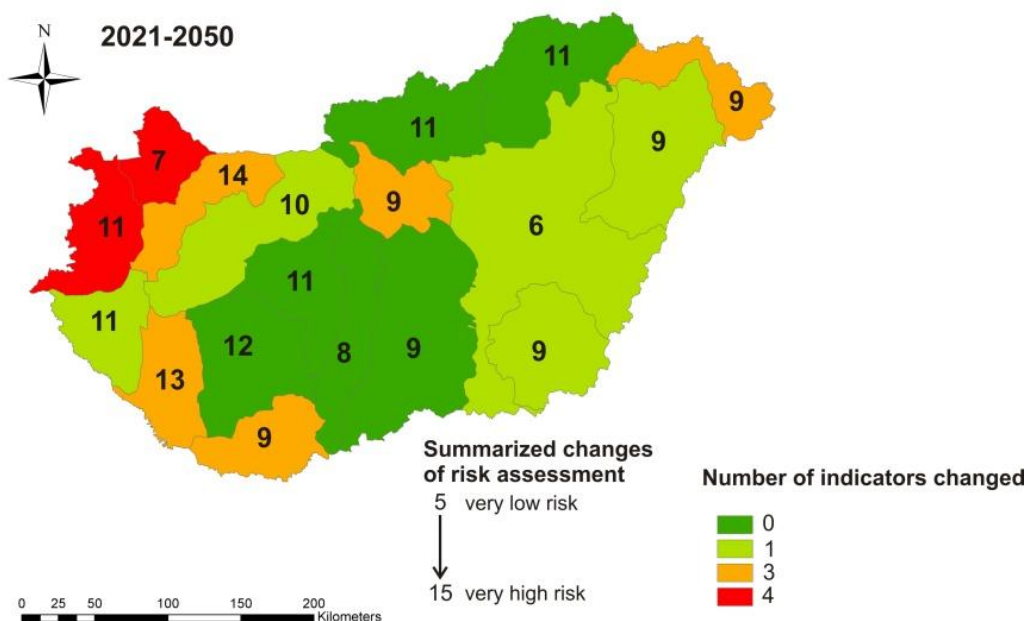


Fig. 9. The number of hazard class changes in the indicators and the additive sensitivity assessment of the meso-regional hazard for 2021–2050 scenarios compared to period 1961–1990 for Hungary

9. ábra. A veszélyességi értékek változása a 2021–2050 es éghajlati adatok alapján, középtáji egységenként (az 1961–1990-es adatokhoz képest)

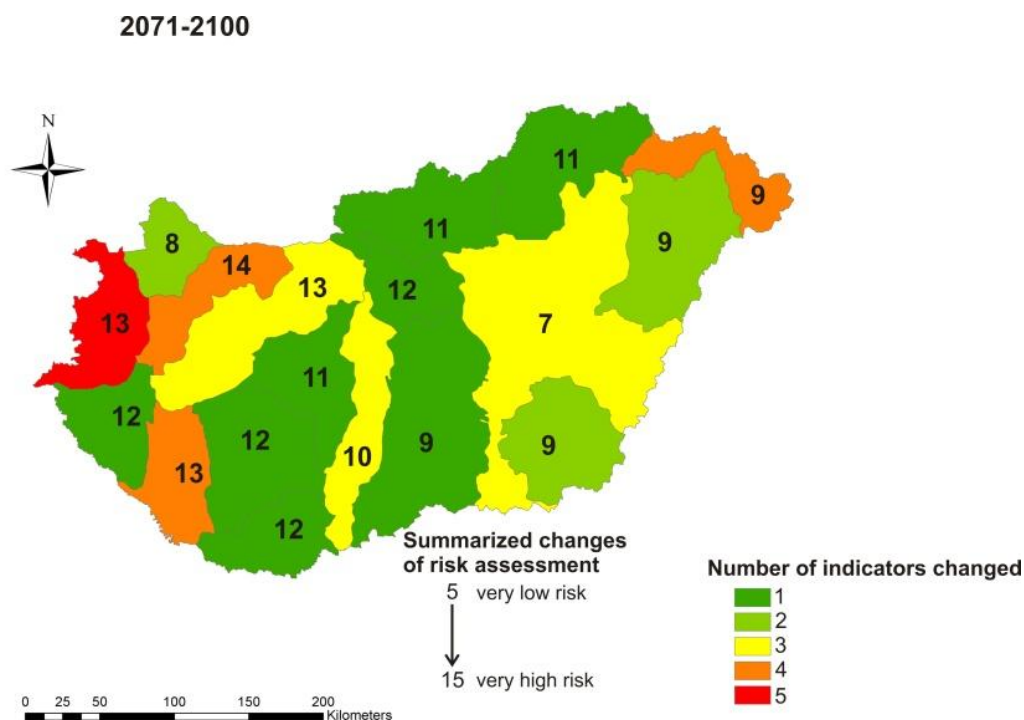


Fig. 10. The number of hazard class changes in the indicators and the additive sensitivity assessment of the meso-regional hazard for 2071–2100 scenarios compared to period 1961–1990 for Hungary

10. ábra. A veszélyességi értékek változása a 2021–2050 és 2071–2100-es éghajlati adatok alapján, középtáji egységenként (az 1961–1990-es adatokhoz képest)

This is mainly caused by that in contrast with SZABÓ et al. (2008) the flood problem was not included into our analysis because the increase in this process is not primarily a consequence of the climate impacts (influencing factors are the capacity of water-deduction of the floodplain, the land use of the catchment, and the construction of dams in the upper section), and the floods are difficult to predict in Carpathian Basin at a regional scale without an enclosure of the surrounding mountains.

Conclusion

The foreknowledge of expected changes in the future climate and in the associated environmental system can be more and more important for creating future planning strategies. Therefore the aim of this research was to describe the potential consequences of the expected climate change on the landscapes. Using the data of REMO and ALADIN models connection was built up between the relevant climate parameters and the changing occurrence and intensity of the important environmental processes. On the basis of the climate models, despite the small area and the relatively low topographic diversity of the country, the two climate simulations showed spatial differences in the parameters. Four regions in Hungary with different climate change tendencies were defined by a cluster analysis based on the temperature, precipitation and extreme indices. In these regions, the climate change tendencies indicated diverse alterations of the social and ecological systems.

As a result of the sensitivity assessment the most vulnerable regions of the country could be defined. This information can promote the development of optimal spatial planning strategies to create more optimal land and water management, which can mitigate the consequences of climate change at the national, regional and local levels.

This hazard projection has several uncertainties. The most important uncertainties are the lack of verification and an accurate definition of the error. Further uncertainty is associated with the A1B scenario, as the projected data are only valid for a definite socio-economic development path. Despite these limitations, the present data set and analysis of the smaller units can provide valuable data for several sectors of society, including the economy, as the analysis can highlight the critical areas.

References

- Bartholy, J. – Pongrácz, R. – Gelybó, G. – Szabó, P. 2008: Analysis of expected climate change in the Carpathian Basin using the PRUDENCE results. *Időjárás*, 112, 249–264.
- Bartholy, J. – Pongrácz, R. 2010: Analysis of precipitation conditions for the Carpathian Basin based on extreme indices in the 20th century and climate simulations for the 21st century. *Physics and Chemistry of Earth*, 35, 43–51.
- Czigány, Sz. – Pirkhoffer, E. – Balassa, B. – Bugya, T. – Bötkös, T. – Gyenizse, P. – Nagyvárad, L. – Lóczy, D. – Geresdi, I. 2010: Villámárvíz mint természeti veszélyforrás a Dél-Dunántúlon. *Földrajzi Közlemények*, 134/ 3, 281–298.
- Csorba, P. – Blanka, V. – Vass, R. – Nagy, R. – Mezősi, G. – Meyer, B. 2012: A hazai tájak működésének veszélyeztetettsége új klímaváltozási előrejelzés alapján (Sensitivity of the Hungarian mesolandscapes according to the modelled climate change). *Földrajzi Közlemények*, 2012/3.
- Dikau, R. – Schrott, L., 1999: The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. *Geomorphology*, 30, 1–12.

- Estrela, T. – Menéndez, M. – Dimas, M. – Marcuello, C. – Rees, G. – Cole, G. – Weber, K. – Grath, J. – Leonard, J., Ovesen, N.B. – Fehér, J. 2001: EEA Sustainable water use in Europe. Part 3: Extreme hydrological events: floods and droughts. 84.
- Flannigan, M.D. – Stocks, B.J. – Wotton, B.M. 2000: Climate change and forest fires. *The Science of the Total Environment*, 262, 221–229.
- Fodor, T-né – Kleb, B. 1986: Magyarország mérnökgeológiai áttekintése. MÁFI, Bp. p. 199
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge University Press, New York, NY. 996p. (<http://www.ipcc.ch>)
- Juhász, Á. 2004: Településeket, létesítményeket veszélyeztető tömegmozgások a balatoni magaspartok mentén. *Földrajzi Közlemények*, 52 (1-4), 19–30.
- Kertész, Á. – Centeri, Cs. 2006: Hungary. In: Boardman, J., Poesen, J. (eds) *Soil erosion in Europe*. John Wiley & Sons, Ltd, London (p. 839) 139–153.
- Loibl, W. – Aubrecht, Ch. 2011: Hungary Climate Regions: Regional statistical analysis of selected Climate Change related indicators and classification of physiogeographic Meso-Regions to Climate Change region types. AIT – Austrian Institute of Technology Vienna, 52 p.
- Lóki, J. 2011: Research of the land forming activity of wind and protection against wind erosion in Hungary. *Riscuri Si Catastrofe* 10:1–13
- Mezősi, G., Meyer, B. C., Loibl, W., Aubrecht, C., Csorba, P., Bata, T. 2012: Assessment of regional climate change impacts on Hungarian landscapes. *Regional Environmental Change* 17/4
- Mezősi, G. – Meyer, B. C. – Loibl, W. – Aubrecht, C. – Csorba, P. – Bata, T. 2012: Assessment of regional climate change impacts on Hungarian landscapes. *Regional Environmental Change* 17/4
- Munka, C. – Cruz, G. – Caffera, R.M. 2007: Long term variation in rainfall erosivity in Uruguay: a preliminary Fournier approach. *GeoJournal*, 70, 257–262.
- Pálfai, I. – Herceg, Á. 2011: Droughtness of Hungary and Balkan Peninsula. *Riscuri si Catastrofe*, An X 9/2, 145–154.
- Pataki, R. 2000: Talajerózió modellezése térinformatikai módszerekkel. Diploma. SzIE, KTI, Gödöllő
- Pécsi, M. – Somogyi, S (1967) Magyarország természeti földrajzi tájai és geomorfológiai körzetei. *Földrajzi. Közlemények*, 15, 285–304.
- Szabó, J. – Lóki, J. – Tóth, Cs. – Szabó, G. 2008: Natural hazards in Hungary, In: Kertész, Á. – Kovács, Z. (eds): *Dimensions and Trends in Hungarian Geography*. MTA FKI, Budapest, 55–68.
- Szabó, P. – Horányi, A. – Krüzselyi, I. – Szépszó, G. 2011: Az Országos Meteorológiai Szolgálat regionális klímamodellezési tevékenysége: ALADINClimate és REMO. 36. Meteorológiai Tudományos Napok OMSZ, Budapest, 87–101
- Szépszó, G. 2008: Regional change of extreme characteristics over Hungary based on different regional climate models of the PRUDENCE project. *Időjárás*, 112 (3–4), 265–284.
- Tobin, G.A. – Montz B.E. 1997: *Natural Hazards: Explanation and Integration*. Guilford Publishing: New York, New York. p. 388
- Wischmeier, W.H. – Smith, D.E. 1978: Predicting rainfall erosion losses. United States Department of Agriculture. *Agriculture Handbook* 537, p. 58

AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS TERÜLETEILEG RÉSZLETESEBB FELBONTÁSÚ ELŐRE VETÍTÉSE ÉS NÉHÁNY KÖVETKEZMÉNYE A KÁRPÁT-MEDENCÉBEN

Bevezetés

Az éghajlati rendszer melegezésének ténye napjainkra elfogadottá vált, s a jövőben jelentős mértékű felmelegedés alakulhat ki, ami együtt jár a csapadékviszonyok megváltozásával és gyakoribb, súlyosabb károkat okozó szélsőséges éghajlati jelenségekkel, melyeknek jelentős természeti, társadalmi-gazdasági következményei lehetnek (IPCC 2007).

A regionális éghajlati változások sok természeti rendszerre vannak hatással, ezért a klíma várható jövőbeni alakulásának ismerete számos területen jelent segítséget. Erre jelenleg a legalkalmasabb módszer a klíma modellek alkalmazása.

A kutatás célja, hogy a Kárpát-medencében a modellek alapján egy évszázadra előre vetíthető éghajlati változásokat olyan környezetileg egységesebb felbontási alpra vonatkozóan mutassuk be, amely területegységek aztán – figyelemmel az időintervallumokra is – lehetővé teszik a környezeti szempontból kritikus felszínalakulásokra, ill. az ott ható folyamatokra a figyelem felhívását. További célunk, hogy megállapítsuk, mely időjárási elemek milyen földfelszíni folyamatokat, jelenségeket fognak olyan mértékben befolyásolni, amely az adott tájegység működésében várhatóan lényeges változásokkal fog járni. Az elemzésbe öt tájműködési indikátort vontunk be: a talajeróziót, a deflációt, az aszályt, a villámárvizeket és a lejtős tömegmozgásokat.

Módszerek

A részletes klimatikus adatok területi sűrűsége, valamint azok tervezési, környezeti használata miatt kézenfekvőnek tűnt a középtájaknál kisebb, de a kistájaknál nagyobb egységekre megadni ezen adatokat. A 230 természeti és környezeti menedzsment szempontból is hasonló kistáj jellemzését az adatsűrűség nem tette lehetővé. Így 18 területi egységet, egyfajta, nem egymásra épülő mezoregiót határoztunk meg. Ezek kialakítása a domborzati, talaj, klíma és felszínborítási tulajdonságok hasonlósága alapján történt.

Az elemzés során a klimatikus paraméterek változását a REMO és az ALADIN modellek alapján számítottuk. A klíma adatok előállítását az OMSZ-nál történt. Az adatok felbontása 0.22°. A két modellből számított, 25 km-es felbontású rácsponti adatokból [napi hőmérséklet (T): °C, napi csapadék (P): mm, nyári napok szám (SU): nap/év, fagyos napok száma (FD): nap/év, extrém csapadékú napok száma (20 mm feletti csapadék – RR20): nap/év, 0 mm feletti csapadék (RR30): nap/év, csapadékin-tenzitási index (SDII): mm/nap] a két modellezett időszakra (2021–2050 és 2071–2100) évi átlagos értékeket számítottunk. Emellett a napi hőmérséklet és csapadékadatokhoz féléves átlagokat is számítottunk, mivel így az éven belüli változások jobban elemezhetőek. A hőmérséklet eltérése az 1961–1990-es bázis adatoktól °C-os eltérésben, a csapadékadatok mm-es eltérésben mérve. A rácsháló pontjaira kiszámított átlag-adatokból a lehatárolt tájegységekre területi átlagot képeztünk.

Eredmények

Mezo léptékű klímaváltozás az ALADIN és REMO modellek alapján

Az évi középhőmérséklet valamennyi tájegységen növekszik az 1961-1990 időszakhoz viszonyítva a két modell alapján 2021–2050-ig 1,2–2 °C-kal, míg 2071–2100-ig 3,4–3,7 °C-kal. Az ország kis területéből adódóan a hőmérsékletváltozásban nagy regionális különbségeket nem jeleznek a modellek, *ennek ellenére megfigyelhető egy fokozatos északnyugat–délkeleti irányú növekedés.*

A hőmérsékleti szélsőségekre jellemző, hogy a nyári napok és száma növekszik, a fagyos napok száma viszont csökken. Itt az évi középhőmérsékletnél valamelyest nagyobb eltérések vannak az országon belül, a leginkább a hőhullámok számának növekedésében lévő különbségek számottevőek. A két modell átlaga alapján 2071–2100-ig északról dél felé haladva növekvő mértékben növekszik a hőség napok és csökken a fagyos napok száma. A nyári napok esetében észak felé haladva egyre nagyobb a növekedés mértéke.

A csapadékmennyiség változásnál az országon belül térben sokkal jelentősebb különbségek vannak. A tájegységek közötti különbség mértéke eléri az évi 90 mm körüli értéket a modellezett időszakokban, sőt az ország különböző tájegységein a változás iránya sem azonos. Az évi csapadékváltozásra a hőmérséklet-változáshoz hasonló térbeli mintázat jellemző, de ellentétes előjellel, ugyanis megfigyelhető egy fokozatos északnyugat–délkeleti irányú csökkenés.

Az extrém csapadékos napok számok száma az országban mindenütt növekszik, mértéke azonban a tájegységek között jelentősen különbözik. A változásnál a jellegzetes térbeli mintázat itt is megfigyelhető, az extrém csapadékos napok számának növekedése nyugaton a legnagyobb és kelet felé csökken, a legkisebb növekedés az alföldi tájegységeken várható

Klimaváltozási típusok a tájegységekre

Az modellezés eredményeképpen nagy mennyiségű – a 2. pontban bemutatott – napi és havi adat állt elő. Az egyveretű környezeti feltételek és kis terület miatt nem kaptunk olyan nagy eltéréseket tartalmazó adatsort, amellyel a klímaváltozást részletesebb – mezoléptékben – jellemezhetjük volna. Az alkalmazott modellek számos esetben eltérő mértékű és irányú változást prognosztizáltak. A változási trend kiszűrésére ezért alkalmaztunk klaszter-elemzést, amellyel változás regionálisan eltérő irányát kíséreltük meg azonosítani.

A klaszter-analízis eredményeképpen 4 eltérő klímaváltozási típusú régiót lehetett elkülöníteni. Az első régió a legnyugatabbi 2 tájegységet foglalja magába. Itt várható a legalacsonyabb átlaghőmérséklet és hőmérsékleti extrém nap növekedés. A csapadékváltozás és az extrém csapadékok változása is itt a legkevésbé jelentős. A következő régió a Dunántúl fennmaradó részeiből alakul ki. Mérsékelt átlaghőmérséklet növekedés, az előző régiónál jelentősebb hőmérsékleti extrém változás jellemző. A csapadékmennyiség változása is mérsékelt, a extrém csapadékos napok száma növekszik. A harmadik régió az ország északi része. Itt a legnagyobb a régióon belüli hőmérséklet változékonyság, a legalacsonyabb évi középhőmérséklet és a hőmérséklet növekedése kevésbé jelentős. A csapadékmennyiség változása mérsékelt. A negyedik régió az Alföld tájegységeit foglalja magába. Itt jellemző jelenleg a legmaga-

sabb átlaghőmérséklet és a legkisebb csapadékmennyiség. A jövőben is itt várható legnagyobb mértékű átlagos hőmérséklet és hőmérsékleti extrém nap növekedés, valamint itt a legvalószínűbb a csapadékmennyiség csökkenése. A csapadékintenzitási index azonban növekszik, ami alapján a csökkenő csapadékmennyiség a mainál koncentráltabban fog esni.

A klímaváltozás hatása a vizsgált környezeti veszélyekre

A villámárvíz veszélyeztetettség meghatározásánál a domborzat, a talaj és az erdőborítottság területi jellemzőit vettük figyelembe. A klímáparaméterek közül a szélsőségesen intenzív, 30 mm-t meghaladó csapadékeseteket vettük számításba. A villámárvíz veszélyeztetettség a klímaváltozás következményeként 2021–2050-ig még leginkább az ország nyugati részén, 2071–2100-ig viszont már a Dunántúl egész területén, valamint az Északi-középhegység területén növekszik.

Az aszályveszély változásának becsléshez a modell-szimulációkkal nyert klímadatokból a magyarországi viszonyokat leginkább figyelembe vevő Pálfai-féle aszályindex (PaDI) alkalmazását ítéltük legmegfelelőbbnek. A klímadatokra támaszkodó aszályveszély becslés kimutatta, hogy 2100-ig az aszályveszély mértéke az ország egész területén növekszik, sőt a jelenleg is legaszályosabb alföldi tájegységeken lesz a legnagyobb, különösen a Körös–Maros köz és a Gödöllői-dombság egységeken.

A széleróziót befolyásoló legfontosabb paraméterek a talaj mechanikai összetétele, a szélesebbesség és a növényborítottság. A klímaváltozás hatásainak elemzéséhez a csapadék és hőmérséklet adatokat egyaránt figyelembe vevő DeMartonne-féle aszályindexet alkalmaztuk. A leginkább érintett térségek a Duna–Tisza köze, Duna-menti sík, Gödöllői-dombság, valamint Belső-Somogy. A szárazodás fokozódásával a 2071–2100 közötti időszakra a szélerózió-veszélyeztetettség tovább fokozódik, amely során a Mezőföld, valamint a Marcal-medence és a Komárom-Esztergomi-síkság területe is erősen veszélyeztetetté válhat.

A tömegmozgásos folyamatok értékelésnél a tömegmozgások által jelenleg érintett területek lehatárolásához az 1960 óta regisztrált eseteket vettük alapul. A klimatikus indikátorok közül a téli félév csapadékösszegét vettük figyelembe a prognóziskészítés számára. A vizsgálatok alapján a lejtős tömegmozgások gyakoriságának és az általuk érintett területek nagyságának növekedésére számíthatunk a Dunántúli-Középhegység területén, a Mecsek–Drávamente, valamint a Gödöllői-dombság környezetében.

A talajerózió érzékenységi meghatározását a WISCHMEIER ÉS SMITH (1978) formula alapján PATAKI (2000) és KERTÉSZ – CENTERI (2006) által országos léptékben szerkesztett térképet vettük figyelembe. A REMO és ALADIN modellekben szereplő klímaváltozás-indikátorok közül az extrém csapadékhullási eseteket és a téli összes csapadékmennyiséget volt érdemes számításba venni. A számítások alapján dombsági területeken a talajerózió növekedésével kell számolni mindkét vizsgált periódusban, főként a Dunántúl nyugati felén.

Összesített klimatikus tájérzékenység

Az öt bemutatott természeti veszély esetére a táji egységek potenciális integratív veszély értékét mutatja be a 8. ábra. A számértékek a várható éghajlatváltozásoknak az elemzett folyamatokra történő hatását két szinten értelmezik: (1) az elemezett 5 muta-

tóból a megváltozott érzékenységek száma (az 1961–1990-es alapértékekhez viszonyítva) és (2) az változások pontértékelése a mezoléptékű egységek 5 paraméterének 1-3 közötti összegzett értékére vonatkozóan az adott időszakban. Az alacsonyabb értékekkel (min. 5) szemben az egyre nagyobb érzékenységek (max.15-öt) érhetnek el. A legnagyobb értékekkel a Marcal-medencében, a Komáromi-síkság és Ny-Magyarország területén találkozunk mindkét időszakban (az elemezett folyamatok többsége a maximális veszélyértéket vetíti előre).

Az eredmények alapján a változások nem jelentenek komolyabb, az emberi életet érintő veszélyt, de számos környezeti folyamat jelentős mértékű, folyamatos, de lassú változása azonban igen jelentős veszélyt jelez előre (pl. aszály).

Összegzés

A klíma és az ezzel összefüggő környezeti rendszerek várható alakulásának megismerése fontos kérdés a jövőbeli tervezési stratégiák kidolgozásánál. Munkánk egyik fő célja éppen ezért annak bemutatása, hogy a várható klímaváltozás milyen következményekkel fog járni a területhasználat, a környezetpolitika számára.

Az elemzés alapján a REMO és ALADIN modellek szerint az országon belül, a kis terület és az alacsony domborzati változékonyság ellenére is megfigyelhetők térbeli különbségek a klímaparaméterek változásában. A hőmérséklet, csapadék és extrém indexek alapján 4 eltérő klímaváltozási tendenciájú régió különíthető el, amelyeken a klímaparaméterek együttes változása a természeti és társadalmi rendszereket eltérő módon befolyásolhatja.

A klímaadatokra támaszkodó elemzések megmutatták a klímaelemek változása az egyes tájegységeken, milyen természeti folyamatok változását, intenzitásának növekedését okozhatják. Kijelölhető, hogy az mely területein kell a tervezésnek különös figyelmet fordítani a változások káros következményeinek elkerülése érdekében. Az idomulás ugyan lassú lehet, de a területi tervezésben mindenképpen figyelembe kell venni, mivel elősegítheti a felkészülést környezeti kockázatra.

Mint minden előrejelzés, ez is sok gyengeséget kordoz magával, az egyik a verifikáció lehetőségének hiánya, a másik pedig (az e körben igen nehezen értelmezhető) hiba megadása. További bizonytalanságot jelent, hogy a következtetések egy adott pályát leíró társadalmi-gazdasági változás mellett (A1B szcenárió) születtek, így csak ez az átlagosnak tekinthető társadalmi-gazdasági fejlődési pálya mellett érvényesek. Mindezen szakmai korlátok mellett is komoly előrelépés, bemutatott kisebb régiókra előállított adatsor, illetve az arra támaszkodó elemzés, ugyanis a predikció számos gondja ellenére az elemzés a társadalom és a gazdaság számos ágazata számára olyan információkat nyújthatnak, amelyek segíthetik tervezési stratégiák kialakítását, amelyek a kedvezőtlen hatásokat mérsékelhetik.